

边坡岩体力学参数对 Hoek-Brown 准则参数敏感性的综合性分析*

许飞^① 胡修文^① 黄香亮^① 童纪伟^① 胡盛明^②

(^①中国地质大学工程学院 武汉 430074)

(^②南昌工程学院水利与生态工程学院 南昌 330099)

摘要 针对广义 Hoek-Brown 准则参数敏感性分析单因素法的局限性,提出利用正交试验法来研究准则参数对岩体力学参数的影响,该方法可以对各因素的影响进行综合性分析,避免单因素法的片面性。以龙桥特大桥 5[#]拱座所在边坡为工程背景进行了基于正交试验的准则参数敏感性分析。结果表明:地质强度指标 GSI 对岩体的变形参数 E_m 的影响最显著;岩石抗压强度 σ_{ci} 和岩体扰动系数 D 对岩体的强度参数 C 、 ϕ 的影响最显著;总体来说,岩体力学参数对地质强度指标 GSI 与岩石抗压强度 σ_{ci} 最敏感,对岩体扰动系数 D 次之,最后为岩石的 Hoek-Brown 参数 m_i ;并且准则参数之间无交互作用,相对独立。

关键词 广义 Hoek-Brown 准则 边坡岩体 力学参数 正交试验 综合性分析

中图分类号:TU452 文献标识码:A

ORTHOGONAL ANALYSIS OF SENSITIVITY OF MECHANICAL PARAMETERS OF SLOPE ROCK MASS TO PARAMETERS IN HOEK-BROWN CRITERION

XU Fei^① HU Xiuwen^① HUANG Xiangliang^① TONG Jiwei^① HU Shengming^②

(^①Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(^②School of Water Resources and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

Abstract This paper examines the effects of parameters in the generalized Hoek-Brown failure criterion on the mechanical parameters of slope rock mass using orthogonal test method. It gives a comprehensive analysis of various factors and effectively explains the limitation of single-factor method. Sensibility analysis of the criterion parameters based on the orthogonal test is done within the slope of 5[#] abutment in Longqiao Extra-large Bridge. It is found that the Geological Strength Index (GSI) influences the rock mass deformation parameter E_m significantly, and the compressive strength σ_{ci} and disturbance factor of rock mass D have greater impact on the rock mass strength parameters C 、 ϕ . In summary, the index GSI and σ_{ci} are more sensitive to the mechanical parameters of rock mass comparing to disturbance factor of rock mass D , and then m_i ; There is no interaction between the criterion parameters, and they are relatively independent.

Key words Generalized Hoek-Brown criterion, Slope rock mass, Mechanical parameters, Orthogonal test, Comprehensive analysis

* 收稿日期:2012-10-20;收到修改稿日期:2013-04-01.

第一作者简介:许飞,主要从事岩土体性质及稳定性分析方面的研究. Email:xufeiy@126.com

1 引言

在工程地质与岩土工程领域,岩体力学参数的准确确定一直都是岩体稳定性分析研究中的关键问题。岩体力学参数的选取是数值模拟、稳定性分析和工程支护设计的基础工作,直接影响着工程的投资和可靠性^[1]。原位测试技术因周期长、费用高并且测试困难,难以大量开展;室内试验由于不能真实地反映岩体的赋存环境和结构特点,其测试结果往往与实际有较大偏差^[2]。

Hoek-Brown 强度准则是 E Hoek 和 E T Brown 根据岩体性质的理论与实践经验,利用试验法导出的半经验岩体强度准则^[3],它不仅有效弥补了 Mohr-Coulomb 等理论强度准则的缺陷,更能体现岩体在变形破坏时的非线性特征,而且将岩体的地质条件通过地质强度指标以定量的方式反映到了岩体力学参数中,为岩体力学参数的确定,提供了一种重要的手段。Hoek-Brown 强度准则从提出到现在 30 多年来,经过不断发展与完善,已广泛应用于岩土工程领域,并积累了丰富的经验。

目前,广义 Hoek-Brown 强度准则参数敏感性分析方面的研究也逐渐得到了发展。黄高峰等^[4]选取了 3 类具有代表性的岩体,利用有限差分法结合算例来分析边坡稳定性,并运用敏感性分析理论研究了 Hoek-Brown 强度准则参数对边坡稳定性系数的影响;郑成果^[5]利用单因素敏感性分析方法研究了隧道底鼓变形量对于 Hoek-Brown 强度准则参数的敏感性,并讨论了 GSI 值与岩体扰动系数 D 的变化对变形量的影响。这些分析方法都是针对单因素来进行分析研究的,即选定一个试验指标,在假设其他影响因素保持不变的条件下,只变化其中的一个影响因素来进行试验分析。

但在实际中控制和影响工程岩体力学性质的因素是多方面的^[6],简单的单因素敏感性分析法并不能满足这一要求。对此,本文提出通过采用正交试验法来研究边坡岩体力学参数对 Hoek-Brown 强度准则参数的敏感性。正交试验法是一种用于多因素敏感性分析的科学研究方法,可以较全面地反映出各因素、各水平对试验指标影响的情况^[7]。基于此,本文采用正交试验法,以龙桥特大桥 5# 拱座所在边坡为工程背景,研究分析了边坡岩体力学参数对广义 Hoek-Brown 强度准则中的完整岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 、岩石块体的 Hoek-Brown 常数 m_i 、岩体地质强度

指标 GSI 和岩体扰动系数 D 共 4 个基本参数的敏感性问题。

2 广义 Hoek-Brown 破坏准则

Hoek 和 Brown 根据岩体性质理论和实践经验,通过对大量岩石三轴试验资料和岩体现场试验成果的分析研究,于 1980 年提出了岩块和岩体破坏时主应力间的关系,即为 Hoek-Brown 准则^[3],亦称为狭义 Hoek-Brown 准则,具体表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中, σ_1 为岩体破坏时的最大主应力; σ_3 为最小主应力; σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度; m 、 s 是与岩性及结构面情况有关的经验参数。

针对狭义 Hoek-Brown 准则的不足, Hoek 引入了参数 a 对其进行修正,其修改后的形式被称为广义的 Hoek-Brown 准则^[8],表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

式中, m_b 、 s 、 a 均为反映岩体特性的参数,其中, m_b 为岩石块体 Hoek-Brown 常数 m_i 的折算值,根据 2002 年版 Hoek-Brown 准则^[9]可表示为以下形式:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, GSI 为岩体的地质强度指标,反映岩体的地质特征; D 为岩体的扰动系数,反映岩体受开挖、爆破等扰动的程度,取值范围 0 ~ 1, 0 表示岩体没有受到扰动或扰动很小, 1 表示岩体扰动严重。

当最小主应力 σ_3 满足 $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ 时, Hoek-Brown 准则可以表示成破坏面上正-剪应力的形式,可用于 Mohr-Coulomb 准则中强度参数的估算^[9-11],两准则参数具有如下关系:

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (4)$$

$$C = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}/[(1+a)(2+a)]} \quad (5)$$

式中, $\sigma'_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_{ci}$

对于 $\sigma_{3\max}$, Hoek 给出了经验公式, 在边坡工程中:

$$\frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad (6)$$

式中, γ 为岩体重度; H 为边坡坡高; σ_{cm} 为岩体抗压强度, 可由等效 Mohr-Coulomb 强度参数确定, 根据 Mohr-Coulomb 破坏准则可以得到岩体的抗压强度为:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (7)$$

当 $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{ci}/4$ 时^[9], 可将式(4)和式(5)代入到式(7)中, 得到

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (8)$$

岩体变形模量可采用如下公式估算^[9]:

$$\left. \begin{aligned} E_m &= \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\frac{GSI-10}{40}} (\sigma_{ci} \leq 100 \text{MPa}) \\ E_m &= \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times 10^{\frac{GSI-10}{40}} (\sigma_{ci} > 100 \text{MPa}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

利用 Hoek-Brown 准则估算岩体力学参数时, 首先需要确定 4 个基本参数: 完整岩石的单轴抗压强度 σ_{ci} 、岩石块体的 Hoek-Brown 常数 m_i 、岩体的地质强度指标 GSI 以及岩体扰动系数 D 。

3 综合性分析

3.1 工程背景

在建的湖北省恩黔高速公路龙桥特大桥的桥址区位于扬子准地台中, 单斜岩层构造, 从属于大集场紧束向斜东南翼, 无大型断层发育。本文选取 5# 拱座所在边坡为研究对象, 边坡高度为 198.7m, 岩性为二叠系下统茅口组炭质灰岩, 上部为中风化炭质灰岩, 厚 40~50m, 层状结构, 下部为微风化炭质灰岩。岩体中发育两组节理, 呈闭合状, 节理面较光滑, 无充填, 穿层性一般。

根据室内岩石试验, 确定岩石的单轴抗压强度 $\sigma_{ci} = 50.0 \sim 75.0 \text{MPa}$; 通过现场地质调查, 确定边坡岩体的结构特征和结构面表面条件, 查量化 GSI 图表^[12, 13], 估算岩体的地质强度指标 $GSI = 49 \sim 53$; 研究区内的岩性主要为炭质灰岩, 根据结晶颗粒的粒度和咬合状态^[14], 由经验类比取 $m_i = 7 \sim 9$; 边坡为小规模爆破开挖, 但其爆破效果较差^[9], 取扰动系数 $D = 0.9 \sim 1.0$ 。

3.2 正交试验设计

正交试验是一种用于多因素试验的科学分析方法, 是在全因素试验中, 利用数理统计与正交性原理, 从大量试验点中挑选出具有代表性的因素组合, 通过正交表科学合理地安排试验, 具有试验次数少, 数据点分布均匀, 结论可靠性高的特点, 能够较全面反映各因素对试验指标的影响程度^[7]。

将 Hoek-Brown 准则的 4 个基本参数作为正交试验的 4 个因素, 根据取值范围, 将其概化为高、中、低 3 个因素水平。同时, 为了减少由于水平次序所引起的系统误差, 可将各因素水平随机排列。各参数取值范围和随机确定的水平次序如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment				
水平	Hoek-Brown 准则参数及编号			
	$\sigma_{ci}(a)/\text{MPa}$	$m_i(b)$	$GSI(c)$	$D(d)$
1	50.0	8.0	49.0	1.00
2	75.0	7.0	53.0	0.95
3	65.0	9.0	50.0	0.90
变化范围	50.0~75.0	7.0~9.0	49~53	0.90~1.00

考虑到因素间的交互作用, 由于 σ_{ci} 、 m_i 、 GSI 值都是与岩石或结构面本身性质有关的参数, 考虑它们之间的交互意义并不大, 但岩体扰动是外部因素, 有可能对上述参数产生一定影响。因此, 假设 σ_{ci} 、 m_i 、 GSI 之间无交互作用, 只考虑 D 与它们之间的交互作用。

根据考虑到交互作用的正交试验设计的基本原理^[7], 选择 $L_{27}(3^{13})$ 正交表安排试验(表 2), 第 1、2 列分别安排因素 d 和 a , 第 5 列安排因素 b , 第 12 列安排因素 c ; 根据 $L_{27}(3^{13})$ 二列间的交互作用列表^[7]确定交互列: 第 3、4 列分别安排因素 d 与因素 a 的交互作用项 $(d \times a)_1$ 和 $(d \times a)_2$, 第 6、7 列与 11、13 列分别安排因素 d 与因素 b 、 c 的交互作用项; 第 8、9、10 列均为空列, 可作为正交试验的误差项。

3.3 试验结果分析

根据 Hoek-Brown 准则中岩体力学参数估算公式计算出各组试验对应的试验指标值, 并对其进行方差分析(表 4)。其基本思想就是将数据的总变差平方和分解为因素的变差平方和 S 与误差的平方和 S_e , 用各因素的变差均方与误差均方相比, 作 F

表2 正交试验设计及试验指标值

Table 2 Design and results of orthogonal experiment

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	试验指标		
	<i>d</i>	<i>a</i>	(<i>dxa</i>) ₁	(<i>dxa</i>) ₂	<i>b</i>	(<i>dx</i> <i>b</i>) ₁	(<i>dx</i> <i>b</i>) ₂				(<i>dx</i> <i>c</i>) ₁	<i>c</i>	(<i>dx</i> <i>c</i>) ₂	<i>E_m</i> /GPa	<i>C</i> /MPa	<i>φ</i> /(°)
1	1(1.00)	1(50.0)	1	1	1(8.0)	1	1	1	1	1	1	1(49.0)	1	3.20	0.53	23.68
2	1	1	1	1	2(7.0)	2	2	2	2	2	2	2(53.0)	2	4.20	0.59	24.79
3	1	1	1	1	3(9.0)	3	3	3	3	3	3	3(50.0)	3	3.54	0.57	25.10
4	1	2(75.0)	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4.33	0.66	27.00
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	4.09	0.61	25.41
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	5.15	0.76	29.63
7	1	3(65.0)	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	4.79	0.69	27.65
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	4.03	0.60	24.98
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3.81	0.62	26.37
10	2(0.95)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4.41	0.65	27.03
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3.71	0.56	24.46
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3.50	0.59	25.86
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	4.29	0.68	27.78
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	5.40	0.76	28.53
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	4.55	0.73	29.27
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	4.23	0.66	27.30
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	4.00	0.61	25.73
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	5.03	0.76	29.86
19	3(0.90)	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	3.89	0.62	26.64
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	3.67	0.58	25.12
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	4.62	0.71	29.10
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	5.66	0.83	31.09
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	4.76	0.72	28.45
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	4.50	0.75	29.97
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	4.19	0.68	27.99
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	5.27	0.75	28.95
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	4.43	0.73	29.46

检验,即可判断因素的作用是否显著^[7]。对于 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验,各统计参数可按以下公式计算

$$S_j = r \sum_{i=1}^3 \left(\frac{T_{ij}}{r} - \bar{y} \right)^2 \quad (10)$$

$$F_j = \frac{S_j/f_j}{S_e/f_e} \quad (11)$$

式中, T_{ij} 为正交表 $L_{27}(3^{13})$ 的第 j 列的第 i 水平的试验结果 y_i 之和, r 为同水平的重复次数; f_j, f_e 分别为影响因素及误差的自由度,由于 8、9、10 列均为误差列,故 $S_e = S_8 + S_9 + S_{10}, f_e = f_8 + f_9 + f_{10} = 2 + 2 + 2 = 6$; 若 S 比 S_e 还小,将 S 当作误差并入到 S_e 中,同时相应的自由度也要并入 f_e 中。

给定显著性水平 α ,根据自由度 f_j, f_e ,查 F 分布分位数表^[15]即可确定临界值 $F_{\alpha}(f_j, f_e)$ (表3)。若

$F_j > F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$,则在检验水平 α 下,该因素作用显著,否则不显著。

表3 F 检验的临界值 $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$ Table 3 The critical values of $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$ for the F verification

显著性水平 α	$f_j = 2, f_e = 18$	$f_j = 2, f_e = 20$
0.0005	11.94	11.38

根据表4中每个试验指标的统计参数 F_j^A ,即可得到 Hoek-Brown 准则参数对不同岩体力学参数影响的显著性(表5)。

由表4、表5可以得出:(1)交互项在方差分析中都被并入了误差项,并且合并后的误差项的方差很小,可以忽略,说明准则参数之间无交互作用,因

表 4 方差分析数据表
Table 4 Analysis of variance table

试验指标	统计参数	方差来源							误差	误差 ^Δ
		$a(\sigma_{ci})$	$b(m_i)$	$c(GSI)$	$d(D)$	$d \times a$	$d \times b$	$d \times c$		
E_m	平方和	3.6164	0.0014 ^Δ	5.2351	0.8300	0.0019 ^Δ	0.0170 ^Δ	0.0051 ^Δ	0.0132	0.0386
	自由度	2	2	2	2	4	4	4	6	20
	方差	1.8082		2.6176	0.4150					
	F_j^{Δ}	937		1356	215					
C	平方和	0.0706	0.0113	0.0432	0.0311	0.0001 ^Δ	0.0001 ^Δ	0.0001 ^Δ	0.0002	0.0005
	自由度	2	2	2	2	4	4	4	6	18
	方差	0.0353	0.0057	0.0216	0.0156					
	F_j^{Δ}	1 307	211	800	578					
ϕ	平方和	36.8408	18.3869	21.0069	27.2489	0.0218 ^Δ	0.0110 ^Δ	0.0472 ^Δ	0.0376	0.1176
	自由度	2	2	2	2	4	4	4	6	18
	方差	18.4204	9.1935	10.5035	13.6245					
	F_j^{Δ}	2 821	1408	1608	2086					

注:“ Δ ”表示该统计项已并入误差项中。

表 5 Hoek-Brown 准则参数的显著性检验

Table 5 The significance test of Hoek-Brown failure criterion parameters

试验指标		Hoek-Brown 准则基本参数			
		σ_{ci}	m_i	GSI	D
岩体变形参数	E_m	II	—	III	I
岩体强度参数	C	IV	I	III	II
	ϕ	IV	I	II	III

注:①表中级数越高代表影响越显著;②“—”表示该项被并入误差中。

此可以不考虑其交互作用的影响。(2)各因素对试验指标影响的显著性:在给定显著性水平 $\alpha = 0.005$ 下, σ_{ci} 、 GSI 、 D 对岩体变形参数 E_m 的影响十分显著, m_i 被并入误差项,对 E_m 基本无影响; σ_{ci} 、 m_i 、 GSI 、 D 对岩体强度参数 C 、 ϕ 的影响均十分显著。(3)各因素对试验指标影响的相对大小:对于岩体变形模量 E_m , $GSI > \sigma_{ci} > D$; 对于岩体内聚力 C , $\sigma_{ci} > GSI > D > m_i$; 对于岩体内摩擦角 ϕ , $\sigma_{ci} > D > GSI > m_i$ 。

4 结 论

利用正交试验法来研究岩体力学参数对于 Hoek-Brown 准则参数的敏感性,可以对各个参数的影响进行多因素综合性分析,更加接近实际情况。相对于单因素的分析方法,其分析结果更具说服力,对于工程实际中正确估算岩体力学参数具有重要的

参考价值。

运用正交试验法,以龙桥特大桥 5[#]拱座所在边坡为工程背景,对准则参数对岩体力学参数的影响进行了综合性分析,其结果表明: GSI 对岩体变形参数 E_m 的影响最显著; σ_{ci} 和 D 对岩体强度参数 C 、 ϕ 的影响最显著;准则参数间无交互作用,相对独立;总体来说, GSI 与 σ_{ci} 对岩体力学参数的影响最显著,其次为 D ,最后为 m_i 。

根据分析结果发现,岩体扰动系数 D 对边坡岩体力学参数具有十分显著的影响,因此在进行岩质边坡稳定性分析时应注意将爆破开挖的影响考虑在内,同时这也验证了 2002 版 Hoek-Brown 准则引入扰动系数 D 的重要性,为推广 2002 版 Hoek-Brown 准则提供了一定的理论支持。

参 考 文 献

- [1] 赵云传,李琦,陈江.分位数回归在岩体力学参数选取中的应用[J].工程地质学报,2012,20(2):283~288.
Zhao Yunchuan, Li Qi, Chen Jiang. Applications of quantile regression to selection of rock mass mechanical parameters. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 283~288.
- [2] 晏鄂川,唐辉明.工程岩体稳定性评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.
Yan Echuan, Tang Huiming. Evaluation and Application of Stability on Rock Mass. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [3] Hoek E, Brown E T. Underground Excavations in Rock[M]. Lon-

- don: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [4] 黄高峰, 李宗利, 牟声远. Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 2163 ~ 2167.
Huang Gaofeng, Li Zongli, Mu Shengyuan. Sensitivity analysis of Hoek-Brown failure criterion parameters on slope projects. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2163 ~ 2167.
- [5] 郑成果. 桃树垭软弱围岩隧道底鼓机理及控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
Zheng Chengguo. Study on the Tunnel Floor Heave Mechanism and Control Technology of Soft-Weak Surrounding Rock in Taoshuya Tunnel. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [6] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增 1): 2624 ~ 2630.
Huang Shuling, Feng Xiating, Zhang Chuanqing. Study of method of comprehensive evaluation for parameters of constitutive model of rock mass. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2624 ~ 2630.
- [7] 吴翊, 李永乐, 胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
Wu Xiang, Li Yongle, Hu Qingjun. Application of mathematical statistics. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1995.
- [8] Hoek E, Wood D, Shah S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[A]. Proceeding of the ISRM Symposium on Rock Characterization[C]. London: British Geotechnical Society, 1992, 209 ~ 214.
- [9] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown Failure Criterion-2002 edition[A]. Proceedings of NARMS-Tac 2002, Mining Innovation and Technology[C]. Toronto: University of Toronto, 2002, 267 ~ 273.
- [10] 李远耀, 殷坤龙, 代云霞. 基于广义 Hoek-Brown 准则强度折减法的岩坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, **28**(增): 347 ~ 352.
Li Yuanyao, Yin Kunlong, Dai Yunxia. Stability analysis of rock slope by strength reduction method based on generalized Hoek-Brown failure criterion. Rock and Soil Mechanics, 2008, **28**(S): 347 ~ 352.
- [11] 胡盛明, 胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 861 ~ 866.
Hu Shengming, Hu Xiuwen. Estimation of rock mass parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown criterion. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 861 ~ 866.
- [12] Sonmez H, Ulusay R. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies[J]. Yerbilimleri Dergisi (Earth Sciences), 2002, **26**: 77 ~ 99.
- [13] 范永波, 任爱武, 熊峥. 基于 GSI 的锦屏地下厂房岩体参数研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 956 ~ 962.
Fan Yongbo, Ren Aiwu, Xiong Zheng. Geological strength index method rock mass parameters about Jinping underground caverns. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 956 ~ 962.
- [14] Hoek E, Marinos P, Benissi M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist formation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1998, **57**(2): 151 ~ 160.
- [15] 全国统计方法应用标准化技术委员会. GB/T4086.4-1983 统计分布数值表 F 分布[S]. 北京: 中国国家标准出版社, 1983.
National Standardization Technical Committee on Application of Statistical Methods. GB/T4086.4-1983 Tables for Statistical Distributions F-distribution. Beijing: China National Standard Press, 1983.